

**PLANEACIÓN PARA LA REDISTRIBUCIÓN DE POTENCIA REACTIVA  
EN SISTEMAS DE POTENCIA MEDIANTE LA UBICACIÓN DE  
CONTROLADORES DE FLUJO DE ENERGÍA UNIFICADO**



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA:  
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Trabajo de titulación a la obtención del título de  
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:  
PLANEACIÓN PARA LA REDISTRIBUCIÓN DE POTENCIA REACTIVA  
EN SISTEMAS DE POTENCIA MEDIANTE LA UBICACIÓN DE  
CONTROLADORES DE FLUJO DE ENERGÍA UNIFICADO.**

**AUTOR:  
HANAN IVAN ALVAREZ TOAPANTA**

**TUTOR:  
DIEGO FRANCISCO CARRIÓN GALARZA**

**Quito, noviembre 2021**

Hanan Ivan Alvarez Toapanta

**PLANEACIÓN PARA LA REDISTRIBUCIÓN DE POTENCIA REACTIVA EN SISTEMAS DE POTENCIA MEDIANTE LA UBICACIÓN DE CONTROLADORES DE FLUJO DE ENERGÍA UNIFICADO.**

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2021  
Ingeniería Eléctrica



*Breve reseña historia e información de contacto:* **Hanan Ivan Alvarez Toapanta** (Y'1993-A'22). Realizó sus estudios secundarios en el colegio Dominicano “San Fernando”, se graduó de Bachiller en Físico Matemático. Egresado de la Carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo de investigación se basa en planeación para la redistribución de potencia reactiva en sistemas de potencia mediante la ubicación de controladores de flujo de energía unificado.

halvarezt@est.ups.edu.ec



*Dirigido por:* **Diego Francisco Carrión Galarza** (Y'1981-M'12). Se graduó como Ingeniero Eléctrico en la Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador en el año 2010 y en la actualidad está trabajando para lograr su título de doctor en ingeniería de la Universidad Politécnica Bolivariana – Medellín, Colombia. Es profesor e investigador de la Universidad Politécnica Salesiana – Quito, Ecuador. En la actualidad es miembro del grupo de investigación GIREI (Grupo de Investigación en Redes Eléctricas Inteligentes – Smart Grid Research Group).

dcarrion@ups.edu.ec

**Todos los derechos reservados:**

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS ©2021  
Universidad Politécnica Salesiana  
QUITO-ECUADOR

## **DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR/A**

Yo, Diego Francisco Carrión Galarza declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación denominado *PLANEACIÓN PARA LA REDISTRIBUCIÓN DE POTENCIA REACTIVA EN SISTEMAS DE POTENCIA MEDIANTE LA UBICACIÓN DE CONTROLADORES DE FLUJO DE ENERGÍA UNIFICADO*, realizado por Hanan Ivan Alvarez Toapanta, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerado como trabajo final de titulación.

Quito, noviembre 2021



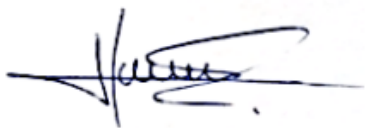
.....  
Diego Francisco Carrión Galarza

Cédula de identidad: 1713703062

## CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Hanan Ivan Alvarez Toapanta, con documento de identificación N° 1725786824, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de grado/titulación intitulado: *PLANEACIÓN PARA LA REDISTRIBUCIÓN DE POTENCIA REACTIVA EN SISTEMAS DE POTENCIA MEDIANTE LA UBICACIÓN DE CONTROLADORES DE FLUJO DE ENERGÍA UNIFICADO*, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



.....  
Nombre: Hanan Ivan Alvarez Toapanta

Cédula: 1725786824

Fecha: noviembre 2021

## ÍNDICE GENERAL

1. Introducción .....	2
2. Marco teórico .....	8
2.1 Flujo de potencia Gauss Seidel .....	8
2.2 Factor de potencia .....	9
2.3 Limitación de costos .....	9
2.4 Limitación de Potencia activa y reactiva .....	10
2.5 Limitación de voltaje y ángulo en las barras.....	10
2.6 Limitación de cargabilidad en líneas de transmisión .....	11
3. Metodología y formulación del problema.....	11
3.1 Ubicación Óptima de UPFC.....	11
3.2 Formulación Matemática Heurística .....	12
3.3 Algoritmo en Matlab para ubicación óptima de UPFC .....	13
3.4 Modelos de Prueba.....	13
3.4.1 Modelo de Prueba IEEE 14 barras .....	14
3.4.2 Modelo de Prueba IEEE 30 barras .....	14
3.4.3 Módulo de prueba UPFC .....	14
4. Análisis de resultados para distintos casos de estudio .....	14
4.1 Modelo de Prueba IEEE 14 barras con UPFC .....	14
4.2 Modelo de Prueba IEEE 30 barras con UPFC .....	17
5. Conclusiones .....	19
5.1 Trabajos Futuros.....	20
6. Referencias.....	20
6.1 Matriz de estado del arte .....	24
6.2 Resumen de Indicadores .....	30

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Modelamiento de 14 barras IEEE.....	14
Figura 2. Modelamiento de 30 barras IEEE.....	14
Figura 3. Modelamiento UPFC [Autor].....	14
Figura 4. Modelamiento de 14 barras IEEE con UPFC [Autor].....	15
Figura 5. Perfiles de tensión para el sistema de 14 barras IEEE.....	15
Figura 6. Ángulos de tensión para el sistema de 14 barras IEEE con UPFC .....	16
Figura 7. Potencia Activa para el sistema de 14 barras IEEE con UPFC. ....	16
Figura 8. Potencia reactiva para el sistema de 14 barras IEEE con UPFC. ....	16
Figura 9. Modelamiento de 30 barras de la IEEE con UPFC [Autor].. ....	17
Figura 10. Perfiles de tensión para el sistema de 30 barras IEEE.....	18
Figura 11. Ángulos de tensión para el sistema de 30 barras IEEE con UPFC.....	18
Figura 12. Potencia Activa para el sistema de 30 barras IEEE con UPFC. ....	18
Figura 13. Potencia reactiva para el sistema de 30 barras IEEE con UPFC. ....	19
Figura 14. Resumen e indicador de la temática – Estado del arte.....	30
Figura 15. Indicador de formulación del problema – Estado del arte.....	30
Figura 16. Indicador de solución – Estado del arte.....	31



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Casos Propuestos 14 barras IEEE con UPFC. ....	15
Tabla 2. Valores de compensación del UPFC en sistema de 14 barras IEEE .....	16
Tabla 3. Casos Propuestos 30 barras IEEE con UPFC. ....	17
Tabla 4. Valores de compensación del UPFC en sistema de 30 barras de la IEEE. ....	19
Tabla 5. Matriz de estado del arte. ....	24

# PLANEACIÓN PARA LA REDISTRIBUCIÓN DE POTENCIA REACTIVA EN SISTEMAS DE POTENCIA MEDIANTE LA UBICACIÓN DE CONTROLADORES DE FLUJO DE ENERGÍA UNIFICADO.

## Resumen

El presente documento expone una metodología heurística la cual busca ubicar de manera óptima dispositivos controladores de flujo de potencia unificado, ya que en la actualidad son uno de los dispositivos FACTS más completos por su estructura interna y su compensación de potencia activa y reactiva en sistemas de transmisión, el estudio se realiza mediante análisis de flujo de potencia, la ubicación del UPFC se ejecuta de forma aleatoria exhaustiva bajo restricciones y limitaciones técnicas que permiten encontrar la mejor zona en la cual se instalará este compensador, para dicha formulación matemática se ha utilizado el software Matlab y posteriormente con el fin de comprobar su efectividad se emplea el software DIgSILENT en el cual se establecen distintos casos de estudio que permiten analizar el comportamiento del sistema de potencia al acoplar el dispositivo a niveles de 33 kV y 132 kV en sistemas de 14 y 30 barras del IEEE, mejorando niveles de voltaje, así como sus ángulos. La potencia real y la potencia reactiva se redistribuyen en el SEP mejorando la calidad de energía desde generación hacia los usuarios finales.

**Palabras Clave:** Compensación reactiva, Control de flujos de potencia, Gauss-Seidel, Planificación de sistema de potencia, Ubicación óptima de UPFC, UPFC.

## Abstract

This document presents a heuristic methodology which seeks to optimally locate unified power flow control devices since they are currently one of the most complete FACTS devices due to their internal structure and their active and reactive power compensation in transmission systems, the location is carried out by means of power flow analysis, the location of the UPFC is carried out in an exhaustive random way under technical restrictions and limitations that allow finding the best zone in which to install this compensator, for this mathematical formulation the Matlab software was used and later, in order to verify its effectiveness, DIgSILENT software was used in which different case studies are established that allow analyzing the behavior of the power system when coupling the device at levels of 33 kV and 132 kV in systems of 14 and 30 buses of IEEE, improving voltage levels, as well as their angles. Real and reactive power are redistributed in the EPS, improving the quality of energy from generation to end users.

**Key Words:** Reactive Compensation, Power Flow Control, Gauss-Seidel, Power System Planning, Optimal UPFC Location, UPFC.

## 1. Introducción

El consumo de energía eléctrica en las últimas décadas ha tenido un aumento significativo a nivel mundial, debido al crecimiento de la población, el cambio de matriz energética en varios países por agotamiento de los recursos fósiles, mientras que el funcionamiento y expansión del Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) se encuentra condicionada por factores de cargabilidad en líneas de transmisión, límites de capacidad en generación, estabilidad de voltaje en nodos críticos del sistema, aspectos económicos y ambientales los cuales han jugado un papel importante en la redistribución y crecimiento de los sistemas de potencia, por lo cual es necesario la introducción de elementos compensadores de potencia reactiva FACTS (De sus siglas en inglés, Flexible AC Transmisión Systems) para aliviar el sistema eléctrico de potencia y asegurar su funcionamiento en condiciones normales y bajo ciertas perturbaciones [1].

La implementación de compensadores paralelo, como SVC, en los sistemas de potencia ha contribuido positivamente en mejorar perfiles de tensión y ángulos de voltaje en los nodos de los sistemas eléctricos como se evidencia en el sistema de prueba de 14 barras IEEE propuesto, mediante una compensación de potencia reactiva aplicando técnica metaheurística de ubicación óptima conocida como Búsqueda Armónica (HS de sus siglas en inglés Harmony Search), la cual presenta restricciones de potencias nodales: activa, reactiva y magnitud de voltaje, buscando de esta manera el lugar idóneo para la ubicación óptima de estos dispositivos [2].

Mediante la ubicación óptima de FACTS se logra tener una mejora en niveles de tensión nodal y mayor control del componente reactivo del sistema, con el principal objetivo de alcanzar un aumento en aspectos de seguridad y estabilidad del SEP. Para lo cual en [3] propone una metodología enfocada en la reducción de costos para la ubicación óptima de compensadores de potencia reactiva. Los resultados en los diferentes escenarios de prueba para la metodología propuesta muestran también una reducción de pérdida de potencia activa, contribuyendo a la estabilidad en niveles generación, transmisión, distribución del sistema eléctrico de potencia.

La localización de zonas de mayor sensibilidad en un SEP y una técnica de aprendizaje no supervisado (K-Means), permite ubicar óptimamente dispositivos basados en compensación de potencia reactiva en nodos específicos, los cuales tienen mayor incidencia en mejorar el voltaje y ángulo en el resto de nodos del sistema eléctrico de potencia, acompañado de minimización en costos de instalación por ubicación [4], [5].

En un SEP es muy importante la etapa de transmisión, ya que es la encargada de transportar todo el flujo de energía de generación hacia distribución por lo tanto, es indispensable en la actualidad colocar dispositivos de compensación FACTS, para dicha ubicación se toma en cuenta factores económicos y límites de operación los cuales permiten el redireccionamiento de flujo de potencia para mejorar perfiles de voltaje acercándose mucho a 1 (pu), colocando dispositivos SVC y SVR en el menor número posible de barras del sistema [6].

Aplicación de criterios de ubicación óptima y contingencias N-1, permitió al SEP, mejorar perfiles de voltaje seguido de una reducción de cargabilidad en las líneas de transmisión, la ubicación se basa en técnica heurística tomando en cuenta la desviación máxima y promedio del voltaje y el factor de potencia para ubicar óptimamente dispositivos SVC en las líneas de transmisión y aplicar las posibles contingencias, robusteciendo al sistema eléctrico de potencia para garantizar su funcionamiento bajo estas condiciones [7].

En [8] los autores proponen como objetivo obtener líneas de transmisión más eficientes energéticamente, para eso se plantea una reducción de flujo de carga del sistema de energía, mediante compensaciones FACTS, se estructura un algoritmo genético (GA) para el dimensionamiento y ubicación de los dispositivos en los diferentes nodos críticos del sistema de potencia, mediante una interfaz gráfica GUI se permite la configuración y elección del tipo de compensador a utilizar. El dimensionamiento es analizado en diferentes tipos de compensadores SVC, TCSC, TCVR, TCPST y UPFC los cuales mejoran aspectos como: estabilidad de voltaje nodal del sistema, minimización de potencia activa y reducción del índice de barras críticas del SEP, brindando mayor seguridad y eficiencia energética.

Mediante una metodología que tiene como punto de análisis la sensibilidad de desviación de voltaje en las barras de los sistemas de prueba de IEEE de 30 y 14 barras y programación no lineal considerando ubicación óptima de SVC, se redujo el costo por minimización de equipos instalados, teniendo mejoras en perfiles de voltaje del 7,75 % y 1,63%,

respectivamente y disminución de pérdidas de potencia reactiva debido a la diferencia angular que existe entre barras [9].

Dentro de un SEP, en la etapa de transmisión es muy importante la ubicación y dimensionamiento de dispositivos de compensación de potencia reactiva, dentro de estos los TCSC y SVC. Para la ubicación óptima de estos dispositivos se utiliza una técnica de enjambre de partículas (PSO), con lo cual se mejora la estabilidad de voltaje nodal y se reduce al mínimo las pérdidas de energía, robusteciendo al SEP [10].

Dentro de los dispositivos más completos en cuanto a compensación y redireccionamiento de flujos de potencia se encuentran los UPFC (controladores de flujo potencia unificados), en la actualidad son uno de los dispositivos más versátiles en cuando a compensación reactiva en sistemas eléctricos de potencia, su estructura interna se basa en electrónica de potencia, están compuestos por dos inversores acoplados en un enlace común de tensión DC mediante un condensador. Las ubicaciones de estos dispositivos híbridos en el SEP permiten controlar el flujo de potencia, mitigando pérdidas de potencia real del sistema, así como mejora en la capacidad de carga para la transferencia de potencia en líneas de transmisión brindando mayor estabilidad de voltaje, los resultados alentadores se evidencia en el sistema de prueba IEEE 14 nodos [11], [12].

En [13], se propone la ubicación óptima de dispositivos de compensación de potencia reactiva en serie, en específico los TSCS, los mismos que son desplegados en un SEP multimáquina, la ubicación se la realiza mediante un

algoritmo genético en donde los valores nominales y ubicación se optimizan simultáneamente, eligiendo de esta forma los lugares idóneos para su instalación con restricción en la cantidad de dispositivos disponibles, en la simulación del sistema se observa la capacidad del algoritmo genético para resolver este tipo de problemas de ubicación óptima, mejorando los perfiles de voltaje nodal y manteniendo al SEP en límites permisibles de operación.

La utilización de FACTS en SEP es una alternativa rentable, ya que mediante estos dispositivos podemos abrir nuevas rutas de intercambio de flujo de energía en líneas de transmisión, esto se logra mediante el acoplo de UPFC en un sistema eléctricos de potencia de 14 barras del IEEE, como resultado se observa un aumento positivo en la capacidad de carga de líneas y se reduce la cargabilidad del SEP mediante la mejora de perfil de voltaje nodal, tomando en cuenta restricciones de tipo ambiental, presupuestario y efectos de salud por exposición a campos magnéticos [14].

Uno de los problemas actuales en los SEP es el colapso y la inestabilidad de la tensión en los diferentes nodos, para ello se considera una metodología basada en algoritmo genético (GA) y optimización de enjambre de partículas (PSO), la misma que ubica los dispositivos en los diferentes nodos críticos del sistema de prueba, seguido de un dimensionamiento óptimo de los compensadores SVC en el sistema de energía. Como se puede observar en los sistemas de prueba de 14 y 30 barras de IEEE existe una mejora significativa en: estabilidad de voltaje, reducción de pérdidas de energía y mejora de la capacidad de carga del SEP [15].

En [16], aborda el problema de ubicación óptima de dispositivos FACTS en específico compensadores UPFC y SVC, los mismos que son dimensionados óptimamente para disminuir la sobrecarga del SEP, también se analiza el comportamiento del sistema bajo una sola contingencia, la optimización se basa en el aprendizaje de la enseñanza mejorada (ITBO) sumada a la optimización mejorada tipo enjambre por peso (WIPSO), la aplicación de la metodología propuesta se emplea en sistemas de 14 barras del IEEE, donde se evidencia la reducción del índice de sobrecarga y la minimización de violaciones de voltaje de seguridad.

En [17], la investigación tiene como objetivo minimizar la inestabilidad de voltaje, ya que en la actualidad es uno de los problemas comunes en los sistemas eléctricos de potencia y si no se controla a tiempo puede desarrollar eventos en cascada hasta llegar al apagón, la metodología se aplica mediante dos análisis, uno estático donde se analiza la inestabilidad del sistema de energía seguido de un análisis dinámico para estructurar el desempeño de los compensadores. Mediante la compensación de potencia reactiva con dos dispositivos FACTS: SVC (Compensadores Estáticos de Var) y STACOM (Compensadores Estáticos Síncronos), se observa en los sistemas de 14 barras del IEEE que los compensadores aumentan la estabilidad del sistema, tomando en cuenta que el mejor desempeño en contingencia tuvo el dispositivo STATCOM.

Es de vital importancia minimizar el tiempo de inestabilidad de voltaje en un sistema eléctrico de potencia, para ello se realizan pruebas con distintos compensadores FACTS, entre ellos

están: SVC, STATCOM, TCSC y HVDC. Mediante los límites de estabilidad de la línea de transmisión se ubican los compensadores para analizar su impacto en el SEP, en los sistemas de prueba de 14 barras del IEEE se establece que existe mejora en el área de la región de estabilidad de voltaje en todos los casos y con mejor índice en el caso de HVDC [18].

Mediante clusteración se plantea encontrar: nodos sensibles, zonas de mayor sensibilidad e influencia en cambios bruscos de carga y reservas de potencia reactiva en el SEP. Este artículo aborda una metodología para localizar estas zonas que tienen mayor impacto en el sistema de energía mediante un análisis detallado de la matriz sensibilidad en diferentes escenarios estocásticos de carga y generación, se establece que teniendo un mayor control local en áreas con déficit de reactivos se puede ubicar de manera óptima dispositivos de compensación mejorando perfiles de voltaje, la metodología fue analizada en el Sistema Nacional Interconectado de Ecuador (SIN) a nivel de transmisión [19].

En los sistemas eléctricos de potencia es muy importante el análisis de flujos de carga ya sea para investigaciones, didáctica, planeamiento del SEP entre otras formulaciones que implican análisis de flujos. Mediante los diferentes métodos como: Gauss-Seidel, Newton-Raphson, Newton-Raphson Desacoplado, Newton-Raphson Desacoplado Rápido y DC podemos observar el comportamiento de los distintos sistemas de energía; para ello se ha programado una interfaz amigable para el usuario mediante MATLAB la cual permite elegir el método y el sistema a analizar [20].

En el siguiente documento se aborda una revisión taxonómica sobre la evaluación del impacto de los controladores de DG y FACTS colocados en los sistemas eléctricos de manera óptima. Para ello se realiza un análisis cualitativo entre las diferentes técnicas híbridas de inteligencia para ubicación óptima de compensadores de potencia reactiva como: PSO+GSA, GA+PSO, GA+EV, GA+FZ, EC+SQP, PSO+AN, entre otros. En los sistemas de energía propuestos se aprecian resultados positivos para el funcionamiento de SEP como: minimización de pérdidas en potencia activa y reactiva, menor contaminación ambiental, maximización de transferencia de carga en el SEP, estabilidad de voltaje y ángulo nodal [21].

Los autores en [22], analizan la evaluación para la ubicación óptima de dispositivos FACTS, para lo cual se analiza y evalúa los diferentes métodos para la ubicación óptima, al igual que las características de los diferentes tipos de controladores: controladores de serie, controladores de derivación, controladores serie-serie combinados y controladores de derivación en serie combinados, los mismos que son utilizados para minimizar pérdidas en generación, estabilizar voltaje, mejorar ángulos de voltaje nodal, aumentar la transferencia de energía en líneas de transmisión y brindar mayor seguridad al sistema eléctrico de potencia, llegando a conclusiones importantes para el óptimo comportamiento del sistema eléctrico de potencia, como el valor de la configuración de variables en los dispositivos compensadores que influencia directamente en el desempeño del SEP, también se determina que el mejor algoritmo para

ubicación óptima es el Algoritmo Genético (GA).

La modelación matemática de los dispositivos FACTS es fundamental para el análisis de compensación de reactivos en los sistemas eléctricos de potencia, mediante este estudio podemos evaluar y configurar las diferentes variables que influyen en los nodos cercanos a la ubicación de los compensadores en el SEP, logrando tener un mayor desempeño y control de las propiedades y características fundamentales de los diferentes tipos de FACTS utilizados en los sistemas de energía, también se analiza detalladamente los flujos de potencia con y sin dispositivos conectados para evaluar su desempeño en varios sistemas y metodologías de prueba propuestas [23].

En [24], se realiza la ubicación óptima de dispositivos FACTS en serie y derivación, el análisis es enfocado a las diferentes técnicas de búsqueda óptima para la incorporación de compensadores en los sistemas eléctricos de potencia, entre las técnicas propuestas están técnicas clásicas de optimización, métodos enfocados en criterios técnicos, métodos heurísticos, meta heurística y métodos basados en simulación. Para la ubicación óptima de estos dispositivos se toma en cuenta aspectos como: estabilidad de voltaje, límites de generación, minimización de pérdida de potencia activa, contingencias, cargabilidad en líneas de transmisión y factores económicos.

En [25], la investigación tiene como objetivo proporcionar una guía más confiable para la planificación de dispositivos SVC en sistemas eléctricos de potencia, la ubicación de estos dispositivos se la realiza mediante un

algoritmo genético (GA), el cual se encarga de la búsqueda del óptimo compensador de refuerzo, mientras que técnicas de multiplicadores de LaGrange se aplican para estimar el mayor margen de VAR en niveles de contingencia de operación crítica, la metodología multiobjetivo tiene las restricciones siguientes: pérdida de energía activa, voltaje de carga más alto, costos de dispositivos, margen reactivo máximo, entre otras condiciones eléctricas y no eléctricas.

Mediante una metodología híbrida de enjambre de partículas (PSO) y análisis de flujo óptimo de potencia (FOP), se plantea la ubicación y dimensionamiento óptimo de dispositivos FACTS como SVC Y TCSC, el análisis multiobjetivo toma en cuenta aspectos como: reducción de costos, maximización de beneficio social, minimización de pérdidas de energía en transmisión, mejora cargabilidad de la red, alivio en violación de voltaje nodal, el método es analizado en un sistema IEEE 30 barras con resultados positivos para el funcionamiento óptimo de SEP [26].

En [27], se analiza y evalúa a diferentes métodos de ubicación óptima para dispositivos compensadores de potencia reactiva en un sistema de prueba IEEE de 118 barras, entre los métodos de búsqueda se encuentran metodologías (SA), (TS) y (GA), las mismas que son evaluadas con dispositivos FACTS como: TCSC, TCVR, TCPST, SVC y UPFC con parámetro de: ubicación, tipo y tamaño, obteniendo resultados positivos en el funcionamiento de los sistemas de potencia propuestos, los métodos con menor tiempo en converger para una solución óptima de ubicación suelen ser (TS) Y (GA).

En [28], se aborda el tema de gestión en la congestión de SEP, la investigación se desarrolla bajo un enfoque actual en el cual existe una desregularización de los sistemas de energía monopolísticos y una alta demanda de energía eléctrica por parte de la creciente población, mediante el monitoreo del Operador del Sistema Independiente (ISO) para administrar la congestión de las líneas de transmisión mediante modificación de topología obteniendo mayor eficiencia del mercado eléctrico, considerando aspectos económicos y operacionales de los elementos del SEP.

En [29], se evalúa los diferentes tipos de métodos usados para ubicación óptima de compensadores de potencia reactiva, los cuales mejoran el margen de voltaje nodal, reducen sobrecarga en líneas de transmisión, minimizan pérdidas de potencia activa y reactiva, el análisis se lleva a cabo mediante varios tipos de algoritmos, convergiendo con mayor velocidad los métodos genéticos (GA) y enjambre de partículas (PSO), también se analiza algunos dispositivos FACTS como: compensador de variación estática (SVC), compensador en serie (TCSC) y el compensador sincrónico estático (STATCOM) los cuales son analizados bajo términos de minimización de costos y costo de inversión del tipo de FACTS con respecto a la estabilidad de voltaje en el sistema de energía.

Mediante indicadores confiables como pérdida de potencia real y minimización de la desviación de voltaje se puede analizar el SEP en condiciones de exceso de carga, con lo cual se puede reducir el riesgo de apagones en el sistema.

La metodología plantea un algoritmo de enjambre de partículas (PSO) basado en

la ubicación y dimensionamiento óptimo para dispositivos SVC, el escenario propuesto para el análisis es bajo contingencias, desconectando la línea de transmisión con los niveles más críticos de inestabilidad de voltaje en un sistema de prueba de 30 barras del IEEE, los resultados son positivos en cuanto a mejorar el margen de seguridad de voltaje al igual que reducción en las pérdidas reales en el sistema de energía, el algoritmo PSO está diseñado para sistemas con mayor número de barras [30].

En la actualidad es indispensable la ubicación óptima de dispositivos FACTS, ya que es una forma de expandir la capacidad del SEP sin la necesidad de construir nuevas topologías y líneas de transmisión, este artículo aborda sobre la evaluación y análisis exhaustivo de los diferentes controladores FACTS tanto sus atribuciones como beneficios de control, estos elementos ofrecen la oportunidad de aumentar la capacidad de control de reactivos, mayor estabilidad de tensión y aumento de transferencia de energía de generación a distribución [31].

En un SEP es importante controlar en el menor tiempo posible perturbaciones desencadenadas por algún tipo de contingencia o sobrecarga que genera inestabilidad de voltaje, obligando al SEP a trabajar en una zona de operación insegura, para ello se implementan compensadores FACTS que juegan un papel fundamental mejorando la seguridad del SEP y aumentan el índice de rendimiento de flujo de potencia real, la ubicación óptima se basa en la sensibilidad de flujo de potencia (PI), los dispositivos incorporados al sistema de prueba IEEE 30 barras son: Compensador de serie controlado



(TCSC) y estático. Compensador de la serie síncrona (SSSC) los cuales generan resultados alentadores para el buen funcionamiento del SEP bajo ciertas condiciones como indican los autores en [1].

En la presente investigación se plantea la redistribución de potencia reactiva en sistemas de potencias mediante la ubicación de controladores de flujo de potencia unificado UPFC, los cuales serán ubicados a base de criterios técnicos, mediante una heurística, con el fin de mejorar perfiles de tensión, ángulos en las distintas barras del SEP y equilibrar la cargabilidad en las líneas de transmisión. La heurística se estructura mediante criterios de óptima ubicación de compensadores FACTS, análisis de flujo de potencia mediante Gauss Seidel, factores técnicos para ubicación de los dispositivos UPFC como: factor de potencia, limitación por unidad instalada de dispositivos UPFC, limitación de potencias, análisis de voltajes, ángulos en las barras del sistema y cargabilidad en líneas de transmisión.

En adelante el artículo se organizará de la siguiente manera. En la sección 2 se realiza una revisión sobre el método de solución para flujos de potencia, así como parámetros eléctricos de decisión para ubicación de UPFC. En la sección 3 se expone la metodología y formulación del problema con temas de: ubicación óptima de UPFC, formulación matemática heurística, algoritmo para ubicación óptima de UPFC y modelos de prueba que analizan el desempeño del algoritmo propuesto bajo diversos casos de estudio. En la sección 5 se analiza el comportamiento de los resultados obtenidos en Digsilent Power Factory. En la sección 6 se establecen conclusiones y por último se exponen

trabajos futuros que se derivan del presente trabajo.

## **2. Marco teórico**

En las últimas décadas la demanda de energía eléctrica ha crecido exponencialmente debido a factores como: expansión y crecimiento poblacional, contaminación por uso de recursos fósiles e incursión de nuevas tecnologías que permitirán el desarrollo acelerado de la humanidad, por esta razón los sistemas de potencia llegan a saturarse ya que son los encargados de generar, transportar y distribuir energía eléctrica alrededor del planeta. Por ello es indispensable analizar y acoplar compensadores de potencia reactiva, los mismos que permiten mantener al SEP dentro de límites operables y niveles aceptables de voltaje en los diferentes nodos, al igual que equilibran y reducen la cargabilidad en líneas de transmisión. Uno de los dispositivos más completos y versátiles en cuanto a compensación de flujos de potencia es el UPFC, el mismo que permite modular tanto potencia reactiva como activa en un sistema de transmisión mejorando varios aspectos en el funcionamiento de un SEP. Por ello se plantea analizar el comportamiento del dispositivo al ser acoplado al sistema de transmisión, para su ubicación e instalación es fundamental analizar conceptos técnicos y criterio óptimo de ubicación los cuales permitirán encontrar el lugar idóneo para su instalación.

### **2.1 Flujo de potencia Gauss Seidel**

En el análisis de sistemas de potencia es preciso considerar los flujos de energía ya sea por razones didácticas, por investigación, por operación o por planeamiento de sistemas eléctricos, ahora al colocar dispositivos

compensadores UPFC cambiarán las características del SEP como: voltajes, ángulos, potencias, corrientes, etc. El método iterativo de Gauss Seidel utiliza los valores calculados de la interacción anterior para calcular los valores de las incógnitas faltantes de una iteración determinada [20], [32].

Para el estudio del método Gauss Seidel es necesario mantener algunas consideraciones tanto para barras PV y PQ respectivamente:

Para Barras de voltaje controlado (PV) Ecuación (1) analiza el voltaje y ecuación (2) la potencia reactiva en la barra.

$$V_i^k = \frac{1}{Y_{ii}} \left[ \frac{P_i - jQ_i}{V_i^{(k-1)*}} - \sum_{j=1}^{i-1} Y_{ij} V_j^k - \sum_{j=i+1}^n Y_{ij} V_j^{(k-1)} \right] \quad (1)$$

$$Q_i^k = -\text{Im} \left[ V_i^{(k-1)*} \left( \sum_{j=1}^{i-1} Y_{ij} V_j^k + \sum_{j=i+1}^n Y_{ij} V_j^{(k-1)} \right) \right] \quad (2)$$

Para barras PQ se tiene la siguiente ecuación:

$$V_i^k = V_i^{\text{esp}} V_i^{k+1} / V_i^{k+1} \quad (3)$$

Para apreciar una convergencia más rápida se utiliza el factor de aceleración (4).

$$V_{i, \text{acel}}^k = (1 - \alpha) V_{i, \text{acel}}^{(k-1)} + \alpha V_i^{(k)} \quad (4)$$

$$\alpha = 1.4$$

El método iterativo finaliza una vez cumplidas las condiciones de convergencia [33].

$$|V_{i, \text{real}}^k - V_{i, \text{real}}^{k+1}| < \text{tolerancia} \quad (5)$$

## 2.2 Factor de potencia

El FP es un parámetro esencial dentro de los sistemas de potencia, ya que es la relación que existe entre la potencia efectiva o activa (P) y el potencial que existe en el sistema (S).

En dispositivos electrónicos el cálculo para el factor de potencia depende de la relación entre el armónico fundamental de la onda de corriente y el valor eficaz (RMS) [7], [34].

Para calcular el factor de potencia se toman las mediciones de las fuentes de voltaje y corriente además de conocer la potencia activa (P), para ello se aplica (6).

$$P = VI \cos \phi \text{ (watt)} \quad (6)$$

Entonces

$$\cos \phi = P / VI \quad (7)$$

Siendo  $\phi$  el desfase del ángulo de voltaje y corriente.

Mediante (8) se puede calcular la potencia reactiva en el sistema

$$Q = VI \sin \phi \text{ (VAR)} \quad (8)$$

Con el propósito de mantener los valores de potencia reactiva dentro de sus límites de operación es indispensable suminístrala desde un dispositivo local como un UPFC [32].

## 2.3 Limitación de costos

La limitación de costos corresponde directamente a la implementación de dispositivos controladores de flujo unificado (UPFC) en las diferentes barras de los sistemas de prueba a excepción de la barra Slack, por lo cual

es importante instalar en el menor número posible estos dispositivos, en consecuencia no se satura el sistema de compensadores y se minimizan los costos por unidad instalada [3], [12], [35].

$$\min \sum_{i=1}^N Z_i * X_i \quad (9)$$

Donde:

$Z_i$  Costo de instalación de UPFC.

$X_i$  Variable binaria del problema

La variable binaria del problema representa:

$$\begin{cases} 0 & \text{no se instala UPFC en la barra } i \\ 1 & \text{si se instala UPF en barra } i \end{cases}$$

Para la ubicación óptima de los dispositivos UPFC en las distintas barras se examinan las restricciones tomadas a consideración para la redistribución de potencia reactiva.

#### 2.4 Limitación de Potencia activa y reactiva

Mediante la ecuación de balance de potencia para n barras se establecerá que la potencia que ingresa sea igual a la que circula por el propio nodo, así se podrá limitar la potencia activa y reactiva que circulan a través de las distintas barras del SEP [3], [35], [36].

$$\begin{aligned} P_{gi} - P_{di} &= V_i^2 G_{ii} \\ &+ \sum_{j=1}^N V_i V_j [G_{ij} \cos \delta_{ij} \\ &+ B_{ij} \sin \delta_{ij}] \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} Q_{gi} - Q_{di} &= V_i^2 B_{ii} \\ &+ \sum_{j=1}^N V_i V_j [G_{ij} \sin \delta_{ij} \\ &+ B_{ij} \cos \delta_{ij}] \end{aligned} \quad (11)$$

Donde:

$P_{gi}, Q_{gi}$  Potencia reactiva y activa del nodo i

$P_{di}, Q_{di}$  Potencia reactiva y activa del nodo i

$V_i V_j$  voltaje en nodos i y j respectivamente

$\delta_{ij}$  Ángulo en nodo i y j

$G_{ii}$  Matriz propia de conductancia nodal

$B_{ii}$  Matriz propia de susceptancia nodal

$G_{ij}$  Matriz mutua de conductancia nodal

$B_{ij}$  Matriz mutua de susceptancia nodal

Para evitar pérdidas de calor, inestabilidad dinámica y voltajes fuera del rango permisible, se ha tomado en cuenta las siguientes restricciones a fin de mantener ciertos rangos de producción de potencia en los generadores [2], [3], [35], [36].

Límites de generación de potencia activa

$$P_{gi, \min} \leq P_{gi} \leq P_{gi, \max} \quad (12)$$

Donde:

$P_{gi}$  Potencia activa de generación en el nodo i.

Los límites de generación de potencia reactiva son establecidos por la curva de capacidad del tipo de generador.

$$Q_{gi, \min} \leq Q_{gi} \leq Q_{gi, \max} \quad (13)$$

Los valores de compensación de reactivos son valores normalizados en dispositivos compensadores.

$$5MVAR \leq Q_{UPFC} \leq 45MVAR \quad (14)$$

#### 2.5 Limitación de voltaje y ángulo en las barras

Con la finalidad de mantener el buen funcionamiento del sistema de potencia

se ha establecido que los niveles de voltaje se encuentren dentro de los márgenes permisibles, tomando en cuenta que los parámetros siempre deben estar  $\pm 10\%$  de la tensión nominal del SEP [12], [35].

$$\begin{aligned} V_{i,min} &\leq V_i \leq V_{i,max} \\ 0.9 &\leq V_i \leq 1.10 \end{aligned} \quad (15)$$

Los ángulos deben estar dentro de los límites operativos del SEP, relacionado con el constante funcionamiento de las líneas de transmisión.

$$\begin{aligned} \delta_{i,min} &\leq \delta_i \leq \delta_{i,max} \\ -35^\circ &\leq \delta_i \leq 35^\circ \end{aligned} \quad (16)$$

## 2.6 Limitación de cargabilidad en líneas de transmisión

Debido a la limitación térmica, cada línea de transmisión en un SEP tiene una potencia aparente máxima  $Simax$  que transmite a través de ella mediante la siguiente desigualdad [36] :

$$S_i \leq Simax \quad (17)$$

Por medio de la separación máxima angular, se podrá tener un margen de operación segura, sin llegar al colapso en las líneas de transmisión, dicho margen se establece para la potencia  $Po$  igual al 70 % de la máxima potencia de transmisión,  $Pmax$

Donde:

$$\%ME = \frac{Pmax - Po}{Pmax} * 100 \quad (18)$$

Siendo:

$$\begin{aligned} Pmax \\ = \frac{|Vemisor||Vreceptor|}{Xequivalente} \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} Xequivalente \\ = Xemisor \\ + XlineaXreceptor \end{aligned} \quad (20)$$

Las potencias de transmisión de una línea vienen dadas por:

$$\begin{aligned} Po \\ = \frac{|Vemisor||Vreceptor|}{Xequivalente} \\ * \sin(\delta) \end{aligned} \quad (21)$$

## 3. Metodología y formulación del problema

Se considera como caso de estudio establecer matemáticamente una metodología para la ubicación de compensadores de potencia reactiva UPFC (Unified Power Flow Controller), los mismos que redistribuirán los flujos de potencia en las líneas de transmisión, mejorando parámetros del SEP como: perfiles de tensión y ángulo en los nodos.

Para lo cual se analizará el comportamiento de los parámetros del sistema eléctrico mediante el estudio de flujos de potencia con el método Gauss Seidel y se lo implementará junto al análisis matemático en el software Matlab.

La heurística planteada considerará restricciones y limitaciones descritas en la sección 2. Mediante las cuales se encontrará el punto idóneo donde se implementarán controladores de flujo de energía unificado, asegurando el buen funcionamiento del sistema eléctrico junto con la calidad de energía, mediante la redistribución de potencia reactiva y activa en la etapa de transmisión. El modelo será implementado en sistemas de 14 y 30 barras del IEEE.

### 3.1 Ubicación Óptima de UPFC

El continuo crecimiento de la población y la alta demanda de energía ha ocasionado sobrecarga en el funcionamiento de los sistemas de potencia, como solución no óptima se ha

planteado incrementar el número de líneas de transmisión años anteriores.

Por esta razón es necesario la incorporación de dispositivos de compensación de potencia reactiva, los mismos que pueden ser ubicados en manera aleatoria en cualquier barra de conexión del SEP [6].

Con la finalidad de ubicar óptimamente los dispositivos FACTS es indispensable analizar la topología del SEP. La misma que está compuesta por (n) nodos o barras de conexión del sistema, en las cuales se implementarán los dispositivos compensadores UPFC, para dicha colocación se toma en cuenta la matriz de conectividad (CM), relacionada con el tamaño del SEP mediante (22) [7], [9], [38], [39].

$$CM_{n \times n} =$$

$$\begin{cases} 0 & \text{si } i = j \\ 1 & \text{si } i \text{ y } j \text{ estan conectados} \\ 0 & \text{caso contrario} \end{cases} \quad (22)$$

Para la ubicación de dispositivos UPFC se considerará restricciones y limitaciones de: factor de potencia, costos, generación de potencia reactiva, voltajes en las barras, ángulos en los nodos, cargabilidad en líneas y generación de potencia activa [3], [35]. A través de las cuales se encontrará el punto idóneo donde se implementarán controladores de flujo de energía unificado UPFC.

### 3.2 Formulación Matemática Heurística

La formulación heurística se basa en la ubicación óptima de dispositivos UPFC, el modelo matemático considera encontrar la zona en la cual el dispositivo compensador tenga mayor influencia positiva en nodos cercanos a donde será conectado, esto se logra a través una búsqueda combinatoria exhaustiva en la cual los niveles de

potencia reactiva son inyectados de acuerdo a ecuación (14), seguido de las restricciones tomadas en cuenta en la sección 2, mediante dicha metodología se analiza la mejor ubicación del UPFC en sistemas de potencia lo cual alivia niveles de voltaje en las diferentes barras del SEP junto con la mejora del ángulo, redistribuyendo la potencia activa y reactiva en el sistema y equilibrando la cargabilidad en líneas. La heurística en Matlab analiza los flujos de potencia mediante el método de Gauss Seidel para n número de barras, en este caso en específico es necesario ingresar el número de nodos del sistema a implementar junto con valores eléctricos iniciales de generación, carga, transformación y líneas de transmisión del sistema de potencia.

Después se calcula la matriz de admitancias con una dimensión N\*N.

Es necesario que el modelo matemático defina el tipo de barras que se está analizando para tener una mejor ubicación del UPFC.

Una vez analizado los flujos de potencia por metodología Gauss Seidel procede a inyectar una cantidad potencia reactiva en cada uno de los nodos del sistema por separado para analizar el efecto que tiene esta compensación sobre todo el sistema eléctrico. Para lo cual se ha utilizado la desviación máxima de voltaje en las diferentes barras de todo el sistema.

Se analiza los resultados obtenidos en los diferentes nodos para seleccionar el nodo idóneo donde se ubicará el UPFC en serie paralelo a la línea de transmisión más cercana a dicha barra, posteriormente se procede a aumentar la cantidad de potencia reactiva inyectada. Debido al factor económico y la configuración de parámetros electrónicos necesaria para la instalación de un controlador de flujo de energía unificado se ha considerado la implementación de un solo dispositivo

UPFC dotado de varios terminales para distintos niveles de voltaje.

### 3.3 Algoritmo en Matlab para ubicación óptima de UPFC en líneas de transmisión en sistemas de potencia.

A continuación, se detallan los pasos para la formulación del algoritmo de ubicación óptima de UPFC:

**Paso 1:** Ingreso de parámetros eléctricos iniciales tanto en líneas de transmisión como nodos.  
 $P_{gi}, Q_{gi}, P_{di}, Q_{di}, \delta_{ij}, V_i V_j, G_{ii}, B_{ii}, G_{ij}, B_{ij}$

**Paso 2:** Determinación Matriz de Admitancias  
 $Y_{BUS}$ .

**Paso 3:** Aplicación del método de flujos de carga Gauss-Seidel.  
 Para Barras de voltaje controlado PV

$$V_i^k = \frac{1}{Y_{ii}} \left[ \frac{P_i - jQ_i}{V_i^{(k-1)*}} - \sum_{j=1}^{i-1} Y_{ij} V_j^k - \sum_{j=i+1}^n Y_{ij} V_j^{(k-1)} \right]$$

$$Q_i^k = -lm \left[ V_i^{(k-1)*} \left( \sum_{j=1}^{i-1} Y_{ij} V_j^k + \sum_{j=i+1}^n Y_{ij} V_j^{(k-1)} \right) \right]$$

Para barras PQ

$$V_i^k = V_i^{esp} V_i^{k+1} / V_i^{k+1}$$

**Paso 4:** Registro de resultados bajo restricciones de límites de voltajes, ángulos, potencia activa y reactiva.

$$NN = \text{Número de nodos}$$

for  $i = 1: NN$

$$\text{result}(i) = (\text{Vol}(i) (\text{ang}(i) p(i) q(i)))$$

end

**Paso 5:** Compensación de potencia Reactiva en pasos de 5 Mvar de acuerdo

a la ecuación (14) en cada una de las barras por separado.

for  $j = 1: NN$

$$vo = \text{Nodos}(:, vo)$$

$$vt = vo$$

for  $k = 1: NN$

$$Sdk = \text{Nodos}(k, Pd_j) + 1i$$

$$* \text{Nodos}(k, Qd_j)$$

$$Sgk = \text{Nodos}(k, Pg_j) + 1i$$

$$* \text{Nodos}(k, Qg_j) + 5$$

end

end

**Paso 6:** Aplicación del método de flujos de carga Gauss-Seidel para el sistema compensado.

$$Sk = Sgk - Sdk;$$

$$Vt(k) = (1/Y(k, k))$$

$$* ((\text{conj}(Sk))$$

$$/ \text{conj}(Vt(k))) - Y(k, :)$$

$$* Vt + Y(k, k) * Vt(k));$$

$$\text{if max}(|Vt| - |vo|) \leq e$$

$$\text{resultcompen}(i) =$$

$$((Vt(k) (\text{angle}(Vt(k)) * \frac{180}{\pi}) p(k) q(k))$$

**Paso7:** Comparación de resultados: minimización de desviación promedio de voltaje,

$$\text{Sum\_vol} = \sum_{k=1}^n Vt(K)$$

for  $t = 1: NN$

$$\text{Desv}_{prom_{vol}}(t) = |NN - \text{Sum\_vol}|$$

end

$$[\text{Barra UPFC}, \text{Desv}_{prom_{vol}}] = \min(\text{Desv}_{prom_{vol}}(t))$$

**Paso 8:** Mostrar resultados:

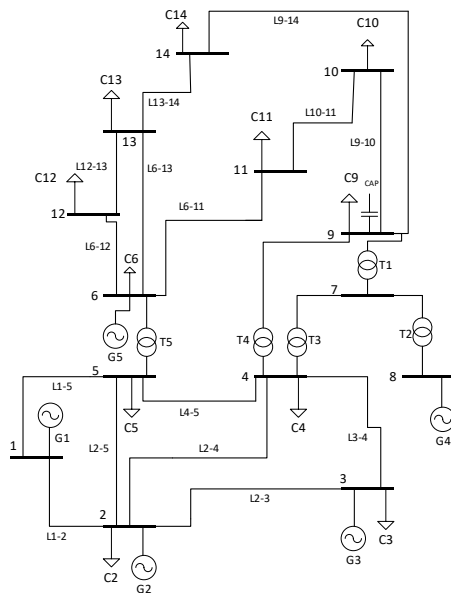
Número de barra idónea para la ubicación del dispositivo compensador, reducción de desviación promedio de voltaje, ángulos, Potencia Reactiva y Potencia Activa

### 3.4 Modelos de Prueba

Para el análisis del sistema de potencia y el rendimiento del UPFC se han tomado en cuenta tres modelos de prueba, dos sistemas de potencia de 14 y 30 barras de la IEEE respectivamente

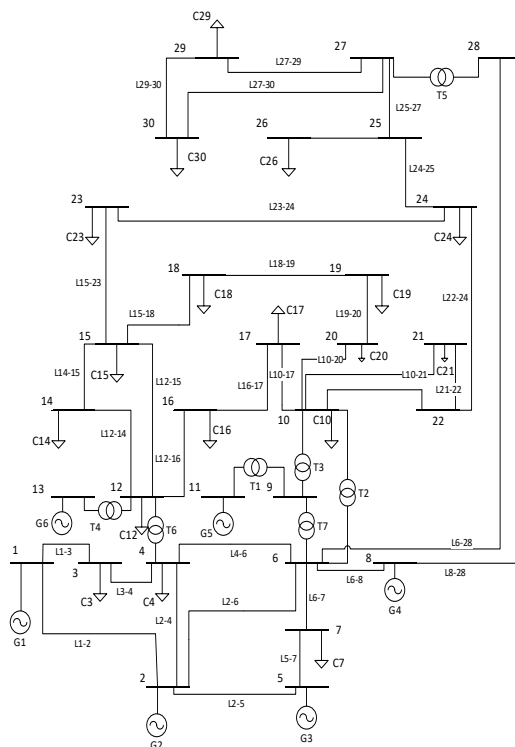
y un modelo de UPFC los mismos que han sido implementados en Digsilent Power Factory.

### 3.4.1 Modelo de Prueba IEEE 14 barras



**Figura 1.** Modelamiento de 14 barras IEEE.

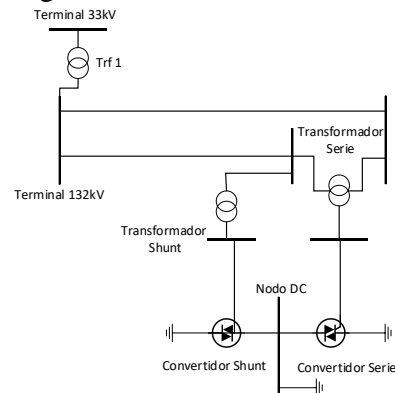
### 3.4.2 Modelo de Prueba IEEE 30 barras



**Figura 2.** Modelamiento de 30 barras IEEE.

### 3.4.3 Módulo de prueba UPFC

El dispositivo está diseñado para el acoplamiento a líneas de transmisión de 33kV y 132kV, consta de un arreglo serie-paralelo de varios dispositivos eléctricos y electrónicos como se indica en la figura 3.



**Figura 3.** Modelamiento UPFC [Autor]

## 4. Análisis de resultados para distintos casos de estudio

Para analizar el comportamiento del dispositivo controlador de energía unificado en los sistemas de potencia se ha tomado en cuenta el resultado de la heurística realizada en Matlab y se procede a instalar un módulo UPFC, considerando diferentes casos de estudio para los modelos de prueba de 14 y 30 barras del IEEE.

### 4.1 Modelo de Prueba IEEE 14 barras con UPFC

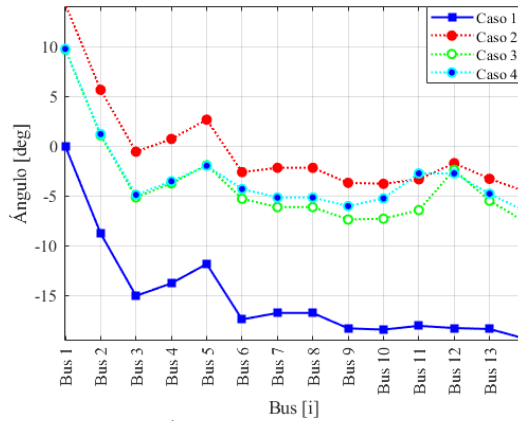
Al aplicar la heurística en el modelo IEEE de 14 barras, una vez considerada las variables de selección y limitaciones propuestas anteriormente; como resultado se obtiene que el módulo UPFC será conectado en serie paralelo a las líneas de transmisión cercanas a la zona de sensibilidad de nodo seis como indica la figura 4.

Estas son las líneas de transmisión conectadas a los nodos 5, 11 y 12 el análisis se lo realiza mediante los casos de estudios descritos en la tabla 1



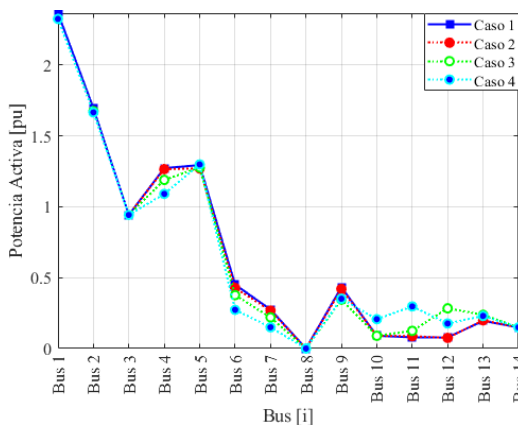


los nodos del sistema cercanos al nodo 6 donde se ha instalado el UPFC, obteniendo una mejora en el SEP de 16,7875% en cuanto a desviación de promedio voltaje con respecto al caso 1 que no presenta UPFC.



**Figura 6.** Ángulos de tensión para el sistema de 14 barras IEEE con UPFC para los distintos casos.

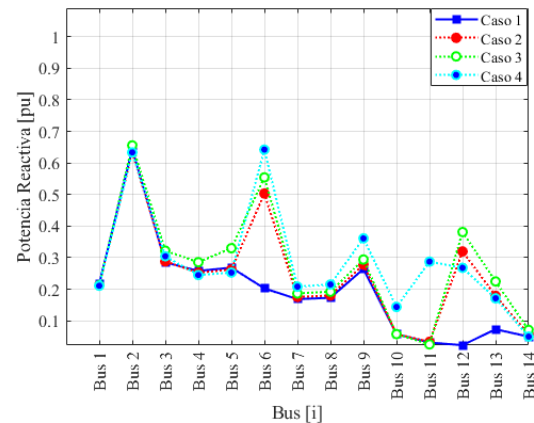
En la figura 6 se aprecia que los ángulos de las distintas barras del sistema al implementar UPFC se encuentran dentro los márgenes propuestos. Mediante el comportamiento angular en el sistema podemos comprobar que al implementar un dispositivo UPFC el ángulo de flujo de potencia se estabiliza en mayor grado en el caso 2, contribuyendo a que el SEP al mantener el sincronismo y el equilibrio.



**Figura 7.** Potencia Activa para el sistema de 14 barras IEEE con UPFC para los distintos casos.

Mediante la implementación de UPFC se redistribuyen los flujos de potencia activa en sistema, para el caso 2 la reducción promedio de voltaje es de 1,3456%, para el caso 3 de 0,9003% y para el caso 4 1,74%, siendo este último el cual presenta mayor disminución de pérdidas en el flujo de potencia activa, reduciendo la cargabilidad de las líneas por efecto Joule, ya que es proporcional al flujo de potencia que circula por el sistema.

Mediante la tabla 2 se puede observar los valores de potencia activa que realiza el UPFC mediante los cuales mantiene al sistema en niveles de voltaje óptimos para los distintos casos, la mayor compensación de potencia activa la realiza en el caso cuatro, aliviando a los generadores.



**Figura 8.** Potencia reactiva para el sistema de 14 barras IEEE con UPFC para los distintos casos.

Los resultados obtenidos por Power Factory muestran la redistribución de Potencia reactiva para los diferentes casos de estudio en el sistema de prueba, así como la respuesta del controlador de energía unificado al momento de realizar la compensación como indica la tabla 2.

**Tabla 2.** Valores de compensación del UPFC en sistema de 14 barras IEEE para los distintos casos.

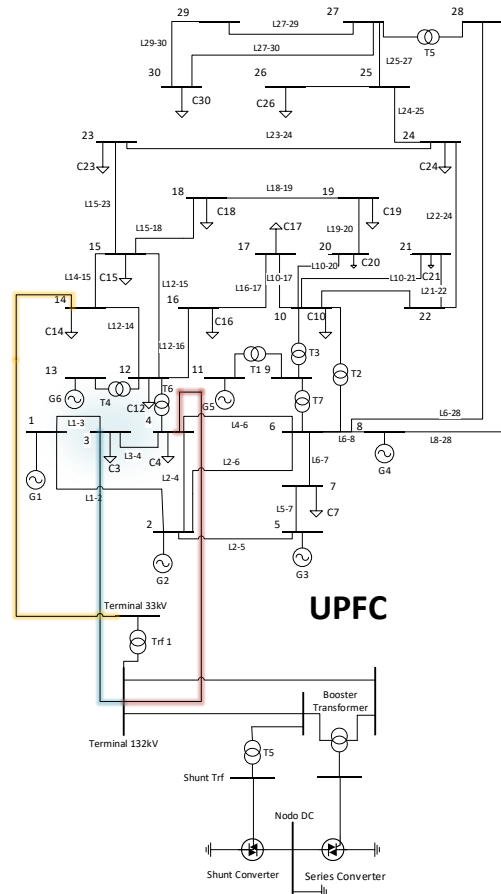
	Terminal	MW	Mvar
caso 1	132kV	30,82368	0,5554995
	33kV	-0,00000001	0
caso 2	132kV	58,2196	42,75035
	33kV	28,14135	37,81007
caso 3	132kV	58,2196	42,75035
	33kV	28,14135	37,81007
caso 4	132kV	77,14403	52,29629
	33kV	47,16192	53,73654

En la tabla 2 se observa que en el caso 1 no presenta compensación de reactivos al sistema a niveles de 33 kV, ya que no está conectado, mientras que existe una demanda de potencia activa y reactiva en niveles de voltaje de 132 kV requerida para el funcionamiento interno del UPFC [40].

Cave recalcar que los niveles más altos de potencia reactiva se encuentran en las barras cercanas a donde está instalado el UPFC estas son 5,11,12,6 con lo cual se logra compensar el déficit de reactivos de estas zonas del SEP manteniendo una desviación mínima promedio de voltaje.

#### 4.2 Modelo de Prueba IEEE 30 barras con UPFC

Al aplicar la heurística en el software Matlab para el modelo IEEE de 30 barras, una vez considerada las variables de selección y limitaciones propuestas anteriormente; como resultado se obtiene que el módulo UPFC será conectado en serie paralelo a las líneas de transmisión cercanas a la zona de sensibilidad de nodo tres, ya que esta es la zona en donde el compensador genera mayor impacto positivo en cuando a reducción de margen de desviación de voltaje promedio, generando también mayor estabilidad en cuando al ángulo en los diferentes nodos de sistema de prueba. El acoplamiento del módulo UPFC y la conexión a las distintas líneas de transmisión de sistema de potencia se observa en la figura 9.

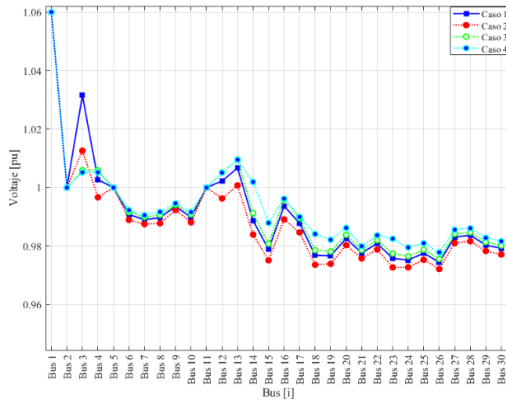


**Figura 9.** Modelamiento de 30 barras de la IEEE con UPFC para los distintos casos [Autor].

Estas son las líneas de transmisión conectadas a los nodos 3,4 y 14; el análisis se lo realiza mediante los casos de estudios descritos en la tabla 3.

**Tabla 3.** Casos Propuestos 30 barras IEEE con UPFC.

Casos	Características
1	Se mantienen los datos originales del sistema de 30 Barras de la IEEE, es decir no existe compensación de reactivos en ninguna línea de transmisión.
2	El sistema presenta compensación mediante la conexión de un módulo UPFC, el cual se encuentra conectado a la línea de transmisión L3-1 a 132kV.
3	El sistema está conectado al módulo UPFC, la compensación se realiza a dos líneas de transmisión: L3-1 y L3-4 a 132kV.
4	El módulo UPFC realiza compensación triple a dos niveles de voltaje. A 132kV en las líneas de transmisión: L6-12 y L6-11. A 33kV en la línea L12-14.

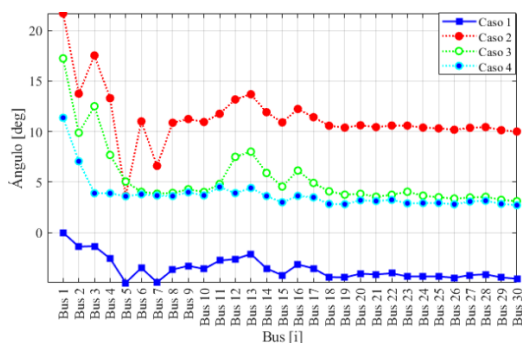


**Figura 10.** Perfiles de tensión para el sistema de 30 barras IEEE para los distintos casos.

Como se observa en la figura 10, los resultados son efectivos para el sistema de potencia cuando se implementa un UPFC, ya que mejoran los valores de voltaje en las barras al acercarse más a 1 pu, en todos los casos los niveles de voltaje en el nodo 3, el cual presenta un mayor pico de voltaje se reducen.

Para el caso 3 los niveles de desviación de promedio de voltaje se redujeron en 4,34%, mientras que para el caso 2 la desviación promedio de voltaje aumenta por lo tanto sería una opción ineficaz de compensación.

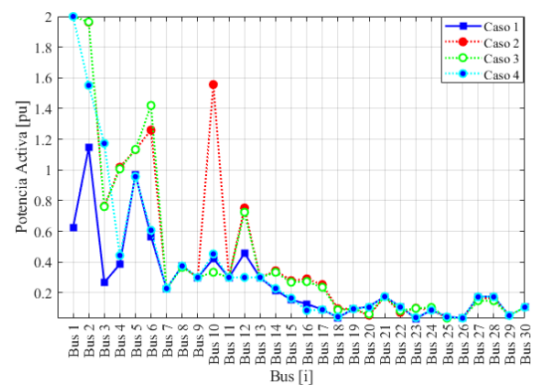
El caso 4 es el óptimo, ya que describe una reducción de 24,261% en desviación promedio de voltaje, mejorando la calidad de energía en las distintas barras del SEP en especial las cercanas a donde se encuentra conectado el UPFC.



**Figura 11.** Ángulos de tensión para el sistema de 30 barras IEEE con UPFC para los distintos casos.

Los ángulos de tensión se estabilizan de manera considerable con respecto al caso 1, podemos observar en la figura 11 que la mejor opción es la compensación correspondiente al caso 4, ya que los valores desde las barras 3 son estables con una magnitud cercana a 3,4 (deg).

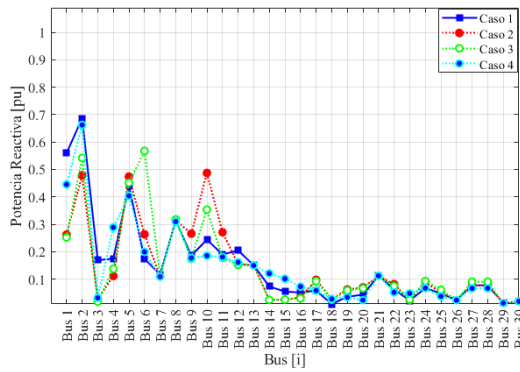
Seguido del caso 3 donde también los ángulos son estables con ciertos picos en las barras 12 y 16, mientras que en el caso 2 correspondiente a la compensación a un nivel de voltaje de 132 kV los ángulos de las barras 1 hasta la 7 son variables debido al exceso de reactivos como indica la tabla 2.



**Figura 12.** Potencia Activa para el sistema de 30 barras IEEE con UPFC

En la figura 12 se observa la redistribución de potencia activa en el sistema de potencia cuando se acopla un UPFC, como se aprecia en las curvas del caso 2 y caso 3 la potencia activa aumenta en los nodos cercanos al UPFC, ya que el controlador para reducir márgenes de desviación de voltaje y estabilizar ángulos es capaz de redistribuir potencia activa en el SEP manteniendo los parámetros de operación segura para el sistema y el dispositivo, también se observa en la curva del caso 4 que la potencia activa disminuye con respecto a los casos anteriores y se mantiene constante con respecto al caso 1, con lo cual se observa la capacidad que tiene el módulo UPFC para generar o absorber potencia activa de acuerdo a la necesidad del sistema,

manteniendo al SEP dentro de los límites seguros de operación.



**Figura 13.** Potencia reactiva para el sistema de 30 barras IEEE con UPFC.

En la figura 13 se observa la redistribución de potencia reactiva, mediante las curvas de los diferentes casos se establece que la compensación se realiza de manera automática de acuerdo al requerimiento del sistema de potencia, para estabilizar voltajes y mejorar tanto ángulos como niveles de voltaje.

El UPFC es un compensador electrónico muy completo el cual inyecta reactivos en el sistema de acuerdo a la configuración y parametrización de los elementos internos y las necesidades del sistema de potencia, por eso la cantidad de reactivos no son valores normalizados como en otros dispositivos, esta cualidad le permite adaptarse a distintas condiciones de operación como indica la tabla 4.

**Tabla 4.** Valores de compensación del UPFC en sistema de 30 barras de la IEEE para los distintos casos.

	Terminal	MW	Mvar
caso 1	132kV	30,82368	0,5554995
	33kV	-0,00000001	0
caso 2	132kV	124,7823	42,77514
	33kV	124,7823	37,03845
caso 3	132kV	125,4621	55,1554
	33kV	0,7029411	4,855447
caso 4	132kV	147,0047	39,00629
	33kV	16,24372	10,81633

## 5. Conclusiones

En el presente trabajo se desarrolló una heurística para la ubicación óptima de dispositivos controladores de flujo de energía unificado. El cual se desarrolla mediante una serie de restricciones técnicas de operación segura, encontrando la zona ideal en la cual se conectó el UPFC. El dispositivo se encuentra estructurado para acoplar a líneas de transmisión de dos niveles de voltaje: 33kV y 132kV. Al acoplar este dispositivo al sistema de prueba de 14 barras se observó que el dispositivo actúa perfectamente en el sistema, redistribuyendo tanto flujos de potencia reactiva como activa para los distintos casos de estudio, en el caso de 14 barras se redujo el margen promedio de desviación de voltaje en 16,7875%, mientras que para el sistema de 30 barras la reducción fue de 24,261%.

Cabe recalcar que la mejora en margen máximo de desviación de voltaje se halla en barras cercanas a donde está acoplado el UPFC, manteniendo al SEP en niveles de operación seguro.

Los ángulos para los dos sistemas mejoraron, ya que se estabilizan aumentando el sincronismo en el sistema.

Los niveles de potencia activa como reactiva en los dos sistemas varían desajustado al caso de estudio, el UPFC se adapta en cuanto a la inyección de flujos que necesita el sistema para los distintos casos de análisis propuestos. En cuanto a pérdidas de potencia en el sistema de 14 barras se observó una disminución, mientras que en el sistema de 30 barras un aumento, de esta forma el dispositivo realiza la distribución de potencias para mantener al sistema dentro de los márgenes estables de ángulo y voltaje.

El UPFC es un dispositivo bastante versátil que permite modular el flujo de

potencia de cualquier sistema de transmisión equilibrando aspectos de voltaje, ángulo y cargabilidad en líneas. Para su funcionamiento interno requiere una cantidad potencia como se observó en los resultados obtenidos e investigaciones relacionadas en sistemas de potencia [40] .

### 5.1 Trabajos Futuros

Los resultados del trabajo permiten formularse nuevas investigaciones como:

1. Aplicar algoritmos genéticos, PSO, inteligencia artificial entre otros para encontrar la ubicación óptima de UPFC.
2. Realizar pruebas en aumentando de carga y aplicando contingencias para observar la reacción del controlador de flujo de energía unificado en régimen transitorio.
3. Parametrizar dispositivos internos del UPFC para realizar compensaciones en otros niveles voltaje en transmisión.

## 6. Referencias

- [1] P. S. Vaidya and V. P. Rajderkar, "Optimal location of series FACTS devices for enhancing power system security," *Int. Conf. Emerg. Trends Eng. Technol. ICETET*, pp. 185–190, 2011, doi: 10.1109/ICETET.2011.58.
- [2] P. A. Achig and D. Carrión, "Compensación óptima de potencia reactiva en sistemas eléctricos de transmisión mediante búsqueda armónica," vol. 1, pp. 1–37, 2019.
- [3] J. J. P. Calupiña and D. Carrión, "Planeación óptima de flujos de potencia reactiva en sistemas eléctricos de transmisión basado en optimización no lineal entera mixta," pp. 1–48, 2019.
- [4] Al. Reinoso and D. Carrión, "Mejora del margen de estabilidad de tensión en sistemas de potencia basado en la ubicación óptima de svc," vol. 1, pp. 1–37, 2020.
- [5] D. Carrión, E. García, J. W. González, I. A. Isaac, G. J. López, and R. Hincapié, "Método Heurístico de Ubicación Óptima de Centros de Transformación y Enrutamiento de Redes Eléctricas de Distribución," *Rev. Técnica "Energía,"* vol. 13, no. 1, 2017, doi: 10.37116/revistaenergia.v13.n1.2017.11.
- [6] D. Pérez Cruz and D. Carrión, "Ubicación Óptima De Dispositivos Facts En Redes Eléctricas De Transmisión Mediante Búsqueda Inteligente," p. 7, 2017, [Online]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/14856%0Ahttps://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/14856/4/UPS-KT01438.pdf>.
- [7] J. J. R. GARCIA and D. Carrión, "Compensación reactiva en redes eléctricas de transmisión basado en ubicación óptima de svc y contingencia N-1," vol. 1, pp. 1–21, 2020.
- [8] K. J. Devi and N. Madhuri, "Optimal Allocation of SVC for Enhancement of Voltage Stability Using Harmony Search Algorithm," *Int. J. Adv. Res. Electr. Electron. Instrum. Eng.*, pp. 6693–6701, 2015.
- [9] J. Ramirez, D. Carrión, and E. Inga, "Reactive compensation in transmission electrical grids based on non-linear programming considering

- optimal SVC location  
Compensación reactiva en redes eléctricas de transmisión basado en programación no lineal considerando ubicación óptima de SVC Reactive,” no. February, 2021.
- [10] V. K. Shende, “Ubicación y tamaño óptimos del compensador de variación estática (SVC) mediante la técnica de optimización de enjambre de partículas (PSO) para Mejora de la estabilidad de voltaje y pérdida de potencia,” no. 1, pp. 2278–2282, 2013.
- [11] C. C. G. Correa and C. L. T. Rodríguez, “Evaluation of the unified controller of power flows in an electrical power system through the PSAT software .,” pp. 1–7, 2017.
- [12] G. Guzmán and J. Muñoz, “Ubicación de un sistema de compensación reactiva en la red de transmisión de energía eléctrica basado en programación no lineal entera mixta considerando cargabilidad de la red,” 2020.
- [13] E. E. Group, “Optimal Location of FACT Devices to Control Reactive Power,” vol. 2, no. 6, pp. 1556–1560, 2010.
- [14] R. D. M. Giri, Mithilesh Singh, “UPFC facts devices in power system to improve the voltage profile and enhancement of power transfer loadability,” p. 14, 2019.
- [15] V. Kamaraj, “Enhancement of Voltage Stability by Optimal Location of Static Var Compensator Using Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization,” vol. 5, no. 1, pp. 70–77, 2014.
- [16] H. A. Devi and S. Padma, “Optimal Location and Parameter Setting of FACTS Devices based on WIPSO and ITLBO for Power System Security Enhancement under Single Contingency,” no. 6, pp. 177–185, 2017.
- [17] K. Z. Heetun, S. H. E. Abdel Aleem, and A. F. Zobaa, “Voltage stability analysis of grid-connected wind farms with FACTS: Static and dynamic analysis,” *Energy Policy Res.*, vol. 3, no. 1, pp. 1–12, 2016, doi: 10.1080/23317000.2015.1128369.
- [18] P. Sharma and A. Kumar, “Thevenin’s equivalent based P-Q-V voltage stability region visualization and enhancement with FACTS and HVDC,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 80, pp. 119–127, 2016, doi: 10.1016/j.ijepes.2016.01.026.
- [19] R. T. Sataloff, M. M. Johns, and K. M. Kost, “Identificación de áreas de control de voltaje en el sistema nacional interconectado,” 2017.
- [20] E. Tenelema, “Simulación de flujos de potencia en sistemas eléctricos de potencia usando métodos completos, desacoplados y linealizados,” p. 19, 2019, [Online]. Available: <https://dSPACE.ups.edu.ec/bitstream/123456789/17625/1/UPS-ST004217.pdf>.
- [21] B. Singh, R. P. Payasi, and V. Shukla, “A taxonomical review on impact assessment of optimally placed DGs and FACTS controllers in power systems,” *Energy Reports*, vol. 3, pp. 94–108, 2017, doi: 10.1016/j.egy.2017.07.001.
- [22] N. Rawat, A. Bhatt, and P. Aswal, “A review on optimal location of FACTS devices in AC transmission system,” *Proc. 2013 Int. Conf. Power, Energy Control. ICPEC 2013*, no. ii, pp.

- 104–109, 2013, doi: 10.1109/ICPEC.2013.6527632.
- [23] R. T. Sataloff, M. M. Johns, and K. M. Kost, *FACTS Modelling and Simulation in Power Networks*. 2004.
- [24] A. Hernandez, M. A. Rodriguez, E. Torres, and P. Eguia, “A review and comparison of FACTS optimal placement for solving transmission system issues,” *Renew. Energy Power Qual. J.*, vol. 1, no. 11, pp. 741–746, 2013, doi: 10.24084/repqj11.435.
- [25] J. S. Huang and M. Negnevitsky, “A messy genetic algorithm based optimization scheme for SVC placement of power systems under critical operation contingency,” *Proc. - Int. Conf. Comput. Sci. Softw. Eng. CSSE 2008*, vol. 1, pp. 467–472, 2008, doi: 10.1109/CSSE.2008.1148.
- [26] K. Ravi, M. Rajaram, and J. Belwin Edward, “Hybrid particle swarm optimization technique for optimal location of FACTS devices using optimal power flow,” *Eur. J. Sci. Res.*, vol. 53, no. 1, pp. 142–153, 2011.
- [27] S. Gerbex, R. Cherkaoui, and A. J. Germond, “Optimal location of FACTS devices to enhance power system security,” *2003 IEEE Bol. PowerTech - Conf. Proc.*, vol. 3, no. July 2003, pp. 61–68, 2003, doi: 10.1109/PTC.2003.1304363.
- [28] S. Thangalakshmi and P. Valsalal, “Congestion management in restructured power systems with economic and technical considerations,” *Asian J. Inf. Technol.*, vol. 15, no. 12, pp. 2079–2086, 2016, doi: 10.3923/ajit.2016.2079.2086.
- [29] D. Gaur and L. Mathew, “Optimal placement of FACTS devices using optimization techniques: A review,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 331, no. 1, pp. 0–15, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/331/1/012023.
- [30] A. S. Sakthivel, A. D. Mary, R. Vetrivel, and V. S. Kannan, “Optimal Location of SVC for Voltage Stability Enhancement under Contingency Condition through PSO Algorithm,” *Int. J. Comput. Appl.*, vol. 20, no. 1, pp. 30–36, 2011, doi: 10.5120/2396-3183.
- [31] P. S. Georgilakis and P. G. Vernados, “Flexible ac transmission system controllers: An evaluation,” *Mater. Sci. Forum*, vol. 670, no. January 2011, pp. 399–406, 2011, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.670.399.
- [32] C. Vásquez Ubilla and G. Reyes Vaca, “Análisis del flujo de potencia en líneas de transmisión largas, usando el banco de pruebas para líneas de transmisión de la UPS-SEDE Guayaquil,” p. 179, 2017, [Online]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/14177/1/UPS-GT001870.pdf>.
- [33] J. Robledo, “Análisis De Colapsos En Sistemas Eléctricos De Potencia,” *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, no. 9, 2014.
- [34] A. Águila Téllez, G. López, I. Isaac, and J. W. González, “Optimal reactive power compensation in electrical distribution systems with distributed resources. Review,” *Heliyon*, vol. 4, no. 8, 2018, doi: 10.1016/j.heliyon.2018.e00746.
- [35] Cristina Alejandra Moreno Pérez, “Ubicación óptima de svcs en sistemas eléctricos de transmisión para la compensación de potencia

- reactiva basada en programación no lineal entera mixta,” vol. 1, pp. 1–37, 2018.
- [36] K. P. Nguyen, G. Fujita, N. D. Tuyen, V. N. Dieu, and T. Funabashi, “Optimal placement and sizing of SVC by using various meta-heuristic optimization methods,” *Proc. - ICPERE 2014 2nd IEEE Conf. Power Eng. Renew. Energy 2014*, vol. 2, no. 2, pp. 7–12, 2014, doi: 10.1109/ICPERE.2014.7067226.
- [37] V. De Atemajac, C. Guadalajara, A. Tepeyac, and F. Prados, “Sistema de cálculo de cargabilidad de líneas de transmisión en sistemas eléctricos de potencia.,” 2008.
- [38] D. Carrión and J. Gonzáles, “Ubicación óptima de una PMU considerando restricciones de contingencias N-1 en los sistemas eléctricos de potencia,” pp. 1–12, 2019.
- [39] D. Carrión, E. Inga, J. W. Gonzalez, and R. Hincapié, “Optimal geographical placement of phasor measurement units based on clustering techniques,” *Proc. - 2016 51st Int. Univ. Power Eng. Conf. UPEC 2016*, vol. 2017-Janua, pp. 1–6, 2016, doi: 10.1109/UPEC.2016.8114003.
- [40] J. Alan and O. Rogelio, “Modelamiento y simulación de un controlador de flujo de potencia unificado para estudios eléctricos en régimen permanente,” 2019.



## 6.1 Matriz de estado del arte

Tabla 5. Matriz de estado del arte.

PLANEACIÓN PARA LA REDISTRIBUCIÓN DE POTENCIA REACTIVA EN SISTEMAS DE POTENCIA MEDIANTE LA UBICACIÓN DE CONTROLADORES DE FLUJO DE ENERGÍA UNIFICADO																																			
	DATOS						TEMÁTICA				FORMULACIÓN DEL PROBLEMA			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA					PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA					SOLUCIÓN PROPUESTA											
ITEM	AÑO DE PUBLICACIÓN	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Ubicación óptima de FACTs	Optimización	Estabilidad	Dimensionamiento	Áreas de control y OPF	Contingencia	Mejora del perfil de tensión	Contingencia	Reducción de pérdidas de potencia	Minimización de Costos	Costos	Ubicación	Capacidad de compensación	Métodos de ubicación óptima FACTs	Flujos de potencia	Perfil de Voltaje	Contingencia (N-1)	PSO (Optimización de enjambre de partículas)	Improved Harmony search algorithm	Algoritmo genético	Multicriterio	Flujos dinámicos de potencia	Diferential evolution algorithm	Ubicación óptima FACTs	Número óptimo de FACTs	Optimización de parámetros de Facts	Minimización de costos	Minimización de pérdidas	Mejora de cargabilidad en líneas	Mejora del perfil de tensión		
1	2011	Optimal location of series FACTS devices for enhancing power system security	25	✗	□	□	✗	□	□	✗	□	✗	✗	□	✗	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	✗	□	□	✗	□	□	□	□	✗	□	□
2	2019	Compensación óptima de potencia reactiva en sistemas eléctricos de transmisión mediante búsqueda armónica	0	✗	✗	□	□	□	□	□	□	✗	□	□	□	□	□	✗	✗	□	□	□	✗	□	□	□	□	□	✗	□	□	□	□	□	□
3	2019	Planeación óptima de flujos de potencia reactiva en sistemas eléctricos de transmisión basado en optimización no lineal entera mixta	0	✗	□	✗	□	□	□	✗	□	✗	□	✗	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	□	✗	□	□	□	✗	□	□	□	□	□	□
4	2020	Mejora del margen de estabilidad de tensión en sistemas de potencia basado en la ubicación óptima de svc	0	✗	□	□	□	✗	□	✗	□	□	□	□	□	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	✗	□	□	□	□	□	□
5	2017	Método Heurístico de Ubicación Óptima de Centros de Transformación y Enrutamiento de Redes Eléctricas de Distribución	22	✗	□	□	□	✗	□	✗	□	□	□	□	□	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	✗	□	□	□	□	□	□

# PLANEACIÓN PARA LA REDISTRIBUCIÓN DE POTENCIA REACTIVA EN SISTEMAS DE POTENCIA MEDIANTE LA UBICACIÓN DE CONTROLADORES DE FLUJO DE ENERGÍA UNIFICADO

		DATOS			TEMÁTICA					FORMULACIÓN DEL PROBLEMA			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA					PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA					SOLUCIÓN PROPUESTA												
ITEM	AÑO DE PUBLICACIÓN	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Ubicación óptima de FACTs	Optimización	Estabilidad	Dimensionamiento	Áreas de control y OPF	Contingencia	Mejora del perfil de tensión	Contingencia	Reducción de pérdidas de potencia	Minimización de Costos	Costos	Ubicación	Capacidad de compensación	Métodos de ubicación óptima FACTs	Flujos de potencia	Perfil de Voltaje	Contingencia (N-1)	PSO (Optimization de enjambre de partículas)	Improved Harmony search algorithm	Algoritmo genético	Multicriterio	Flujos dinámicos de potencia	Diferential evolution algorithm	Ubicación óptima FACTs	Número óptimo de FACTs	Optimización de parámetros de Facts	Minimización de costos	Minimización de pérdidas	Mejora de cargabilidad en líneas	Mejora del perfil de tensión		
6	2017	Ubicación Óptima De Dispositivos Facts En Redes Eléctricas De Transmisión Mediante Búsqueda Inteligente	2	✖	✖	□	□	□	□	□	□	✖	□	□	□	□	✖	□	□	□	□	□	✖	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	
7	2020	Compensación reactiva en redes eléctricas de transmisión basado en ubicación óptima de svc y contingencia N-1,	0	✖	✖	□	□	□	□	□	✖	□	□	□	□	□	□	□	□	□	✖	□	□	□	✖	□	□	✖	□	□	□	□	□	✖	□
8	2015	Top PDF Optimal Allocation of SVC for Enhancement of Voltage Stability Using Harmony Search Algorithm			✖						✖							✖														✖			
9	2021	Reactive compensation in transmission electrical grids based on non-linear programming considering optimal SVC location Compensación reactiva en redes eléctricas de transmisión basado en programación no lineal considerando ubicación óptima de SVC Reactive	3	✖	□	□	✖	□	□	□	□	□	✖	✖	□	✖	□	□	□	✖	□	□	□	□	✖	□	□	✖	□	□	□	□	□	✖	□
10	2013	Ubicación y tamaño óptimos del compensador de variación estática (SVC) mediante la técnica de optimización de enjambre de partículas (PSO) para Mejora de la estabilidad de voltaje y pérdida de potencia	1	✖	□	✖	□	✖	□	□	□	✖	□	□	✖	✖	□	□	□	□	□	✖	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	✖	□
11	2017	Evaluation of the unified controller of power flows in an electrical power system through the PSAT software	0	✖	□	✖	□	□	□	✖	□	□	□	□	□	□	□	□	✖	□	□	□	□	✖	□	□	□	□	□	□	□	□	□	✖	✖
12	2020	Ubicación de un sistema de compensación reactiva en la red de transmisión de energía eléctrica basado en programación no lineal entera mixta considerando cargabilidad de la red	0	✖	□	✖	□	□	□	✖	□	□	□	□	□	□	□	✖	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	✖	✖	

# PLANEACIÓN PARA LA REDISTRIBUCIÓN DE POTENCIA REACTIVA EN SISTEMAS DE POTENCIA MEDIANTE LA UBICACIÓN DE CONTROLADORES DE FLUJO DE ENERGÍA UNIFICADO

		DATOS		TEMÁTICA						FORMULACIÓN DEL PROBLEMA			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA						PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA						SOLUCIÓN PROPUESTA										
ITEM	AÑO DE PUBLICACIÓN	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Ubicación óptima de FACTs	Optimización	Estabilidad	Dimensionamiento	Áreas de control y OPF	Contingencia	Mejora del perfil de tensión	Contingencia	Reducción de pérdidas de potencia	Minimización de Costos	Costos	Ubicación	Capacidad de compensación	Métodos de ubicación óptima FACTs	Flujos de potencia	Perfil de Voltaje	Contingencia (N-1)	PSO (Optimización de enjambre de partículas)	Improved Harmony search algorithm	Algoritmo genético	Multicriterio	Flujos dinámicos de potencia	Differential evolution algorithm	Ubicación óptima FACTs	Número óptimo de FACTs	Optimización de parámetros de Facts	Minimización de costos	Minimización de pérdidas	Mejora de cargabilidad en líneas	Mejora del perfil de tensión		
13	2010	Optimal Location of FACT Devices to Control Reactive Power	30	✖	□	□	□	✖	□	□	□	□	□	□	✖	✖	□	□	□	□	□	□	□	✖	□	□	□	✖	✖	□	□	□	□	✖	
14	2019	UPFC facts devices in power system to improve the voltage profile and enhancement of power transfer loadability	11	✖	□	□	✖	□	□	✖	□	□	□	✖	✖	□	□	□	□	□	□	□	□	□	✖	□	□	□	□	□	□	□	✖	✖	
15	2014	Enhancement of Voltage Stability by Optimal Location of Static Var Compensator Using Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization	2	✖	□	✖	□	□	□	✖	□	□	□	□	✖	□	□	✖	□	□	□	✖	□	□	□	□	□	□	✖	✖	□	□	□	□	□
16	2017	Optimal Location and Parameter Setting of FACTS Devices based on WIPSO and ITLBO for Power System Security Enhancement under Single Contingency	2	✖	✖	□	□	□	□	□	✖	□	✖	✖	□	□	✖	✖	□	□	□	✖	□	□	✖	□	□	□	□	□	✖	□	□	□	✖
17	2016	Voltage stability analysis of grid-connected wind farms with FACTS: Static and dynamic analysis	29	□	✖	✖	□	□	□	✖	✖	□	□	□	□	□	□	□	✖	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	✖	□	□	□	✖
18	2016	Thevenin's equivalent based P-Q-V voltage stability region visualization and enhancement with FACTS and HVDC	26	✖	□	✖	□	□	□	□	□	✖	□	□	✖	□	□	□	□	□	□	□	□	□	✖	□	□	□	□	□	✖	□	□	□	✖
19	2017	Identificación de áreas de control de voltaje en el sistema nacional interconectado	0	✖	□	□	✖	✖	□	□	□	✖	□	□	✖	□	□	□	□	□	□	□	□	□	✖	□	□	□	□	✖	□	□	□	□	✖
20	2019	Simulación de flujos de potencia en sistemas eléctricos de potencia usando métodos completos, desacoplados y linealizados	4	▪	□	□	▪	▪	□	□	□	▪	□	□	▪	□	□	□	□	□	□	□	□	✖	□	□	□	▪	□	□	□	□	□	▪	

# PLANEACIÓN PARA LA REDISTRIBUCIÓN DE POTENCIA REACTIVA EN SISTEMAS DE POTENCIA MEDIANTE LA UBICACIÓN DE CONTROLADORES DE FLUJO DE ENERGÍA UNIFICADO

	DATOS			TEMÁTICA						FORMULACIÓN DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA					PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA						SOLUCIÓN PROPUESTA									
ITEM	AÑO DE PUBLICACIÓN	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Ubicación óptima de FACTs	Optimización	Estabilidad	Dimensionamiento	Áreas de control y OPF	Contingencia	Mejora del perfil de tensión	Contingencia	Reducción de pérdidas de potencia	Minimización de Costos	Costos	Ubicación	Capacidad de compensación	Métodos de ubicación óptima FACTs	Flujos de potencia	Perfil de Voltaje	Contingencia (N-1)	PSO (Optimización de enjambre de partículas)	Improved Harmony search algorithm	Algoritmo genético	Multicriterio	Flujos dinámicos de potencia	Differential evolution algorithm	Ubicación óptima FACTs	Número óptimo de FACTs	Optimización de parámetros de Facts	Minimización de costos	Minimización de pérdidas	Mejora de cargabilidad en líneas	Mejora del perfil de tensión	
21	2017	A taxonomical review on impact assessment of optimally placed DGs and FACTS controllers in power systems	11	✗	✗	□	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	□	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	✗	□	□	□	□	□	□
22	2013	A review on optimal location of FACTS devices in AC transmission system	19	✗	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	□	✗	✗	□	□	□	□	□
23	2004	FACTS Modelling and Simulation in Power Networks		✗	□	□	✗	□	□	□	□	✗	□	□	□	□	□	✗	□	□	□	□	□	□	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	□
24	2013	A review and comparison of FACTS optimal placement for solving transmission system issues	13	✗	✗	□	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
25	2008	A messy genetic algorithm based optimization scheme for SVC placement of power systems under critical operation contingency	10	✗	✗	□	✗	□	□	✗	□	□	□	□	□	□	□	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	□	✗	□	□	□	□	□	□
26	2011	Hybrid particle swarm optimization technique for optimal location of FACTS devices using optimal power flow	11	✗	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	□	✗	□	✗	✗	□	□	□	✗	□	□	□	□	□	✗	✗	□	□	□	□	□
27	2003	Optimal location of FACTS devices to enhance power system security	168	✗	✗	□	□	□	□	□	□	□	□	□	✗	✗	✗	□	□	□	□	□	□	✗	□	✗	□	□	✗	✗	✗	□	□	✗
28	2016	Congestion management in restructured power systems with economic and technical considerations	3	▪	▪	□	□	□	□	□	□	□	□	□	▪	▪	▪	□	□	□	□	□	□	▪	□	▪	□	□	▪	▪	✗	□	□	▪
29	2018	Optimal placement of FACTS devices using optimization techniques: A review	21	✗	▪	□	□	□	□	□	□	□	□	□	▪	✗	✗	□	□	□	□	□	□	▪	□	▪	□	□	▪	▪	▪	□	□	✗

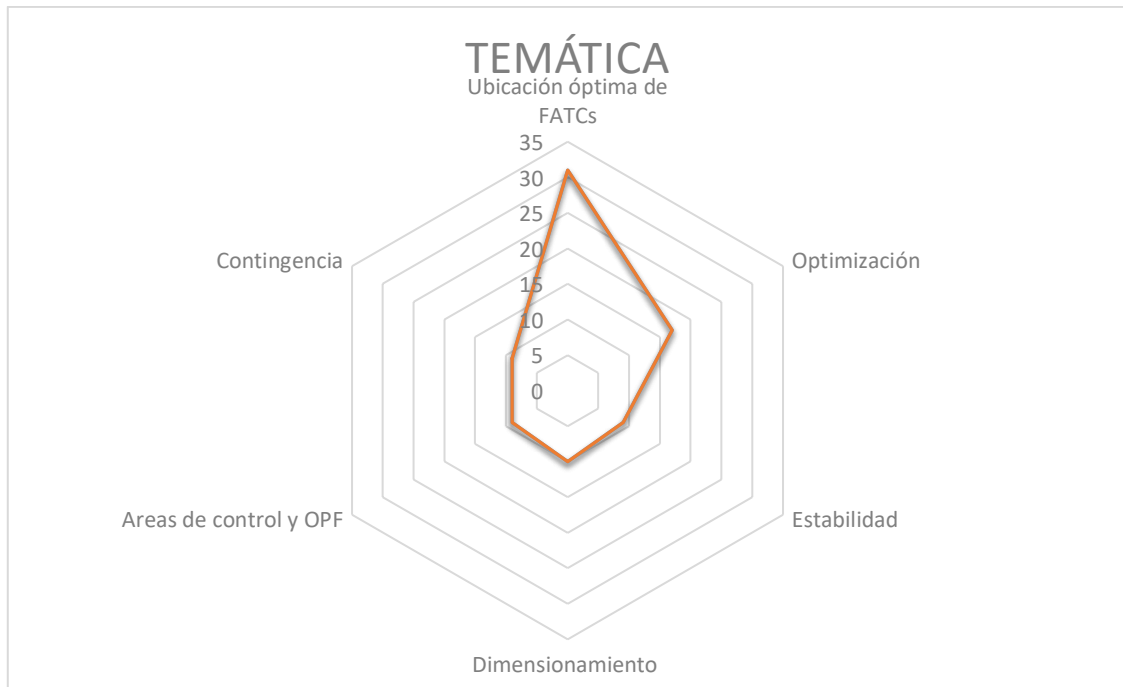
# PLANEACIÓN PARA LA REDISTRIBUCIÓN DE POTENCIA REACTIVA EN SISTEMAS DE POTENCIA MEDIANTE LA UBICACIÓN DE CONTROLADORES DE FLUJO DE ENERGÍA UNIFICADO

	DATOS			TEMÁTICA					FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	RESTRICCIONES DEL PROBLEMA					PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA					SOLUCIÓN PROPUESTA														
ITEM	AÑO DE PUBLICACIÓN	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Ubicación óptima de FACTs	Optimización	Estabilidad	Dimensionamiento	Áreas de control y OPF	Contingencia	Mejora del perfil de tensión	Contingencia	Reducción de pérdidas de potencia	Minimización de Costos	Costos	Ubicación	Capacidad de compensación	Métodos de ubicación óptima FACTs	Flujos de potencia	Perfil de Voltaje	Contingencia (N-1)	PSO (Optimización de enjambre de partículas)	Improved Harmony search algorithm	Algoritmo genético	Multicriterio	Flujos dinámicos de potencia	Diferential evolution algorithm	Ubicación óptima FACTs	Número óptimo de FACTs	Optimización de parámetros de Facts	Minimización de costos	Minimización de pérdidas	Mejora de cargabilidad en líneas	Mejora del perfil de tensión	
30	2011	Optimal Location of SVC for Voltage Stability Enhancement under Contingency Condition through PSO Algorithm	27	✖	✖	✖	□	□	✖	✖	✖	□	□	□	□	□	□	□	□	✖	✖	□	□	□	□	□	□	✖	✖	□	□	□	□	□
31	2011	Flexible ac transmission system controllers: An evaluation	52	✖	✖	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	✖	✖	□	□	□	□	□	□	□	✖	□	□	□	□	□	□	✖	□	✖
32	2019	Ubicación óptima de una PMU considerando restricciones de contingencias N-1 en los sistemas eléctricos de potencia	16	□	✖	□	□	□	✖	□	✖	□	□	□	✖	□	□	□	□	□	✖	□	□	□	✖	□	□	□	□	□	□	□	□	□
33	2016	Optimal geographical placement of phasor measurement units based on clustering techniques	21	✖	□	□	✖	□	□	□	□	□	□	□	✖	□	□	✖	□	□	□	□	□	□	✖	□	□	✖	□	□	□	✖	□	□
34	2018	Ubicación óptima de svcs en sistemas eléctricos de transmisión para la compensación de potencia reactiva basada en programación no lineal entera mixta	0	✖	✖	□	□	□	□	□	□	□	✖	□	✖	□	□	□	□	□	□	□	□	□	✖	□	□	□	□	□	□	□	✖	□
35	2017	Análisis del flujo de potencia en líneas de transmisión largas, usando el banco de pruebas para líneas de transmisión de la UPS-SEDE Guayaquil	0	□	✖	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	✖	□	□	□	□	□	□	✖	□	□	□	□	□	□	□	□	□
36	2014	Análisis De Colapsos En Sistemas Eléctricos De Potencia	6	□	□	✖	□	□	✖	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	✖	□	□	□	□	□	□	□	□	□

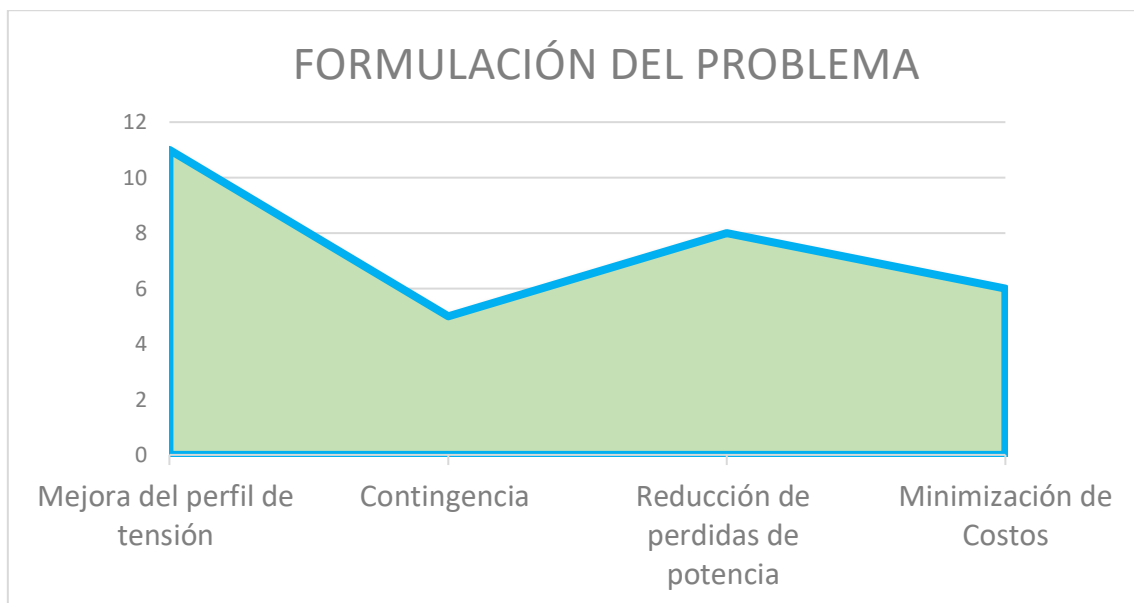
# PLANEACIÓN PARA LA REDISTRIBUCIÓN DE POTENCIA REACTIVA EN SISTEMAS DE POTENCIA MEDIANTE LA UBICACIÓN DE CONTROLADORES DE FLUJO DE ENERGÍA UNIFICADO

		DATOS	TEMÁTICA							FORMULACIÓN DEL PROBLEMA			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA					PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA					SOLUCIÓN PROPUESTA												
ITEM	AÑO DE PUBLICACIÓN	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Ubicación óptima de FACTs	Optimización	Estabilidad	Dimensionamiento	Areas de control y OPF	Contingencia	Mejora del perfil de tensión	Contingencia	Reducción de pérdidas de potencia	Minimización de Costos	Costos	Ubicación	Capacidad de compensación	Métodos de ubicación óptima FACTs	Flujos de potencia	Perfil de Voltaje	Contingencia (N-1)	PSO (Optimización de enjambre de partículas)	Improved Harmony search algorithm	Algoritmo genético	Multiterio	Flujos dinámicos de potencia	Diferential evolution algorithm	Ubicación óptima FACTs	Número óptimo de FACTs	Optimización de parámetros de Facts	Minimización de costos	Minimización de pérdidas	Mejora de cargabilidad en líneas	Mejora del perfil de tensión		
37	2018	Optimal reactive power compensation in electrical distribution systems with distributed resources. Review	41	✖	□	□	□	□	□	□	□	□	✖	□	✖	✖	□	□	□	□	□	□	□	□	✖	□	□	□	□	□	□	✖	✖	✖	✖
38	2014	Optimal placement and sizing of SVC by using various meta-heuristic optimization methods	6	✖	□	□	□	□	□	□	□	□	□	✖	✖	✖	□	✖	□	□	□	✖	✖	□	✖	□	□	✖	✖	✖	□	□	□	□	□
39	2008	Sistema de cálculo de cargabilidad de líneas de transmisión en sistemas eléctricos de potencia	1	□	✖	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	✖	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
40	2019	Modelamiento y simulación de un controlador de flujo de potencia unificado para estudios eléctricos en régimen permanente	0	✖		✖				✖								✖	✖														✖	✖	
				31	17	9	10	6	3	11	5	8	6	6	17	9	10	13	2	3	7	3	2	16	4	1	16	8	5	3	9	6	15		

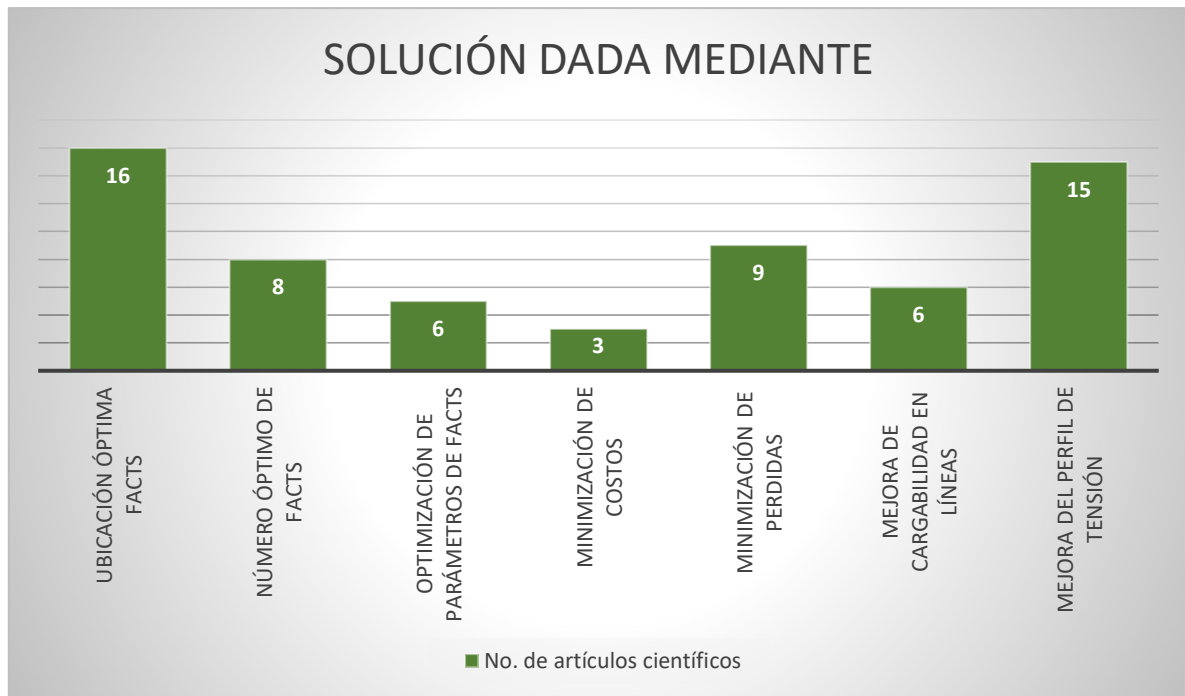
## 6.2 Resumen de Indicadores



**Figura 14.** Resumen e indicador de la temática – Estado del arte.



**Figura 15.** Indicador de formulación del problema – Estado del arte.



**Figura 16.** Indicador de solución – Estado del arte.